



การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงจากผงถ่านไม้

โดยการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้ง

Preparation of Activated Carbons with High Surface Area from Wood Charcoal Powder by Dry Chemical Activation

พิทักษ์ อยู่มี¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงด้วยวิธีการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้งจากผงถ่านไม้ โดยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการก่อกัมมันต์ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารก่อกัมมันต์ อุณหภูมิและ เวลาที่ใช้ในการก่อกัมมันต์ จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากผงถ่านไม้ เมื่อใช้ NaOH เป็นสารกระตุ้น มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างปริมาณผงถ่านไม้ต่อสารกระตุ้นเป็น 1:3 อุณหภูมิ 600 °C และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 2 ชั่วโมง ที่สภาวะดังกล่าวได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 1,247 mg/g และพื้นที่ผิว BET เท่ากับ 1,214.52 m²/g ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ถูกนำไปตรวจหาคุณลักษณะเฉพาะด้วยเครื่อง FT-IR, XRD และ SEM การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้งเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย เตรียมง่าย และได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง

¹สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก 65000

ABSTRACT

Wood charcoal powder was used to prepare high surface area activated carbon by dry chemical activation method. Optimum activation conditions i.e. activation reagent and wood charcoal powder ratios, activation temperatures and activation times were investigated. The experimental results showed that the weight ratio between wood charcoal powder and NaOH as 1:3, activation temperature of 600 °C and activation time of 2 hours gave the highest surface area product. The activated carbon production under optimum conditions had an iodine number of 1,247 mg/g and BET surface area of 1,214.52 m²/g. The activated carbon was also characterized by FT-IR, XRD and SEM. Therefore, the preparation of activated carbon by dry chemical activation has several benefits i.g. it is cheap, simple and it provide high surface area products

คำสำคัญ: ผงถ่านไม้ ถ่านกัมมันต์ การก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้ง

Keywords: Wood charcoal powder, Activated carbon, Dry chemical activation

บทนำ

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติหรืออินทรีย์วัตถุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ (activation process) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (~1,000 m²/g) มีความสามารถในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี (Hayashi et al., 2000) จึงนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ มากมาย เช่น การบำบัดน้ำ (Song et al., 2010) ตัวดูดซับกลิ่น ตัวดูดซับสีและสารกรอง (Nabais et al., 2008) ตัวเร่งหรือตัวรองรับตัวเร่ง (catalyst supports) และวัสดุกักเก็บพลังงาน (Lillo-Rodenas et al., 2006) เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุชีวมวลและอุตสาหกรรมการเกษตร (Qiao et al., 2001; Hayashi et al., 2005) ในอุตสาหกรรมการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นมีปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบและมีราคาสูง ส่งผลทำให้ราคาของถ่านกัมมันต์มีราคาสูง (Tong et al., 2012) ดังนั้นจำเป็นต้องหาวัตถุดิบที่มี

ราคาถูกและหาได้ง่ายโดยทั่วไป วัตถุดิบที่นำมาเตรียมถ่านกัมมันต์ควรมีสมบัติดังนี้ คือ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง (โดยปกติสูงกว่า 45%) และมีปริมาณสารระเหยต่ำ (Ahmedna et al., 2000) วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ ถ่านหิน (Chattopadhyaya et al., 2006; Jibril et al., 2007; Li et al., 2007; Pietrzak et al., 2007) กะลามะพร้าว (Achaw and Afrane, 2008) และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (ภควดี, 2551) เป็นต้น

การเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นด้วยการก่อกัมมันต์ เนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว (surface area) หรือการทำให้พื้นผิวมีความว่องไวมากขึ้น กรรมวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ในปัจจุบันมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบและสมบัติที่ต้องการ โดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การคาร์บอนไนซ์ (carbonization) เป็นการให้ความร้อนทำให้สาร

ระเหยแตกตัวและแทรกออกจากวัตถุดิบทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำเรียกว่า ถ่าน (charcoal) ส่วนขั้นตอนที่สองเรียกว่า การก่อกัมมันต์ (activation) เป็นการทำให้ผิวถ่านเกิดรูพรุนขนาดต่าง ๆ (Yen et al., 2011) ในขั้นตอนการก่อกัมมันต์โดยทั่วไปมี 2 วิธี ได้แก่ การก่อกัมมันต์ทางกายภาพ (physical activation) และการก่อกัมมันต์ทางเคมี (chemical activation) (Mohan and Pittman, 2006) การก่อกัมมันต์ทางกายภาพจะทำในสถานะแก๊ส เช่น ใช้ไอน้ำ (Avelar et al., 2010), CO₂ (Aworn et al., 2009) จะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแต่ต้องใช้เวลานานและใช้อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ได้ผลผลิตต่ำและมีค่าใช้จ่ายพลังงานสูง ส่วนการก่อกัมมันต์ทางเคมีใช้สารเคมีเป็นสารก่อกัมมันต์ (activator) ใช้เวลาไม่นานและอุณหภูมิในการก่อกัมมันต์ต่ำ ได้โครงสร้างรูพรุนที่ดีกว่า (Gratuito et al., 2008; Taya et al., 2010) สารเคมีที่ใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ H₃PO₄ (Prahast et al., 2008), KOH (Sun and Webley, 2010), K₂CO₃ และ ZnCl₂ (Yang and Qui, 2010; Kantarli and Yanik, 2010) เป็นต้น จากงานวิจัยของ Liou and Wu (2009) พบว่าเมื่อใช้ NaOH เป็นสารก่อกัมมันต์จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง

ในประเทศไทยมีการนำไม้ชนิดต่าง ๆ มาเผาเป็นถ่านไม้สะอาดคุณภาพสูงใช้ในประเทศและเพื่อการส่งออก สำหรับเศษและผงถ่านไม้ที่เหลือไม่เหมาะนำไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงและเหลือทิ้ง นักวิจัยจึงสนใจนำผงถ่านไม้ (wood charcoal powder) ที่ได้จากการเผาเป็นวัสดุตั้งต้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์ เนื่องจากผงถ่านไม้มีค่าความชื้น (moisture content) ต่ำ มีคาร์บอนเสถียร (fixed carbon) มากกว่า 80% และปริมาณสารระเหย น้อยกว่า 10% ที่สำคัญผงถ่านไม้ได้ผ่านกระบวนการคาร์บอนแล้ว จึงเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกและหาง่าย แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อจำกัด

เกี่ยวกับขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่ำ งานวิจัยนี้จึงสนใจการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบใหม่แทนการก่อกัมมันต์แบบดั้งเดิมที่นำวัสดุตั้งต้นแห้งในสารละลายของสารก่อกัมมันต์แล้วทำให้แห้งโดยการให้ความร้อน เรียกว่า การก่อกัมมันต์แบบเปียกชุ่ม (impregnation) ซึ่งใช้เวลาและสิ้นเปลืองพลังงานมาก จึงคิดว่าถ้าใช้สารก่อกัมมันต์ในสถานะของแข็งผสมโดยตรงกับวัตถุดิบที่เรียกว่า การก่อกัมมันต์แบบแห้ง (dry activation) โดยให้ความร้อนโดยตรงจะทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างสมบูรณ์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้งด้วยสารกระตุ้น NaOH รวมทั้งวิเคราะห์ต้นทุนการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้หลักเศรษฐศาสตร์อย่างง่าย

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบ

งานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบพิเศษและผงถ่านไม้ยูคาลิปตัสจากโรงงานในจังหวัดพิษณุโลกมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 60 mesh (250 ไมครอน) หลังจากนั้นทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2. การเตรียมถ่านกัมมันต์

การเตรียมถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้จะใช้การกระตุ้นทางเคมีแบบแห้ง นำผงถ่านไม้ที่ได้มาบดผสมกับ NaOH และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม หลังจากนั้นหาเวลาที่เหมาะสมในการก่อกัมมันต์โดยเพิ่มระยะเวลาเป็น 3 และ 4 ชั่วโมง ใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 °C ต่อนาที (อัตราส่วนระหว่าง ผงถ่านไม้:NaOH สัดส่วนโดยมวลเป็น 1:1 1:2

1:3 1:4) ล้าง NaOH ที่เหลือในสารผลิตภัณฑ์ด้วยสารละลาย HCl เข้มข้น 0.1 molL^{-1} หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและ อบให้แห้งที่อุณหภูมิ $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3. การหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

ทางการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ พื้นที่ผิว (surface area) ด้วยเครื่อง specific surface area analyzer รุ่น Tristar II บริษัท micromeritics ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller)

4. การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number) ของถ่านกัมมันต์

การทดลองนี้เป็นการหาปริมาณการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จากความสามารถในการดูดซับไอโอดีนบนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ค่าการดูดซับไอโอดีนมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ (mg/g) (ธราพงษ์, 2554) นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 (ASTM Committee on Standards, 1998a)

5. การตรวจหาลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์

นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปตรวจหากลุ่มฟังก์ชันนัล (functional groups) บนพื้นผิวด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR) รุ่น FTIR S5_iD5 บริษัท Thermo Scientific Nicolet หาโครงสร้างผลึกโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer; XRD) รุ่น PW 3040/60 X'Pert Pro consde บริษัท Phillips และลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) รุ่น LEO 1450 VP บริษัท LEO

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลของการเตรียมถ่านกัมมันต์

จากการนำผงถ่านไม้มาก่อกัมมันต์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว โดยนำผงถ่านไม้มาก่อกัมมันต์แบบแห้งด้วยสารก่อกัมมันต์ NaOH โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนโดยมวล (mass ratio) ของผงถ่านไม้ต่อสารก่อกัมมันต์ แสดงผลดังตารางที่ 1

จากการทดลองพบว่าพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้งเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยมวลของผงถ่านไม้ต่อสารก่อกัมมันต์ จากอัตราส่วน 1:1 จนถึงอัตราส่วน 1:3 แล้วลดลงที่อัตราส่วน 1:4 ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $600\text{-}800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อาจเนื่องมาจาก NaOH ที่มากเกินไป พบว่าอัตราส่วนโดยมวล 1:3 ที่อุณหภูมิ $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่าพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ $1,214.52 \text{ m}^2/\text{g}$ และค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ $1,247 \text{ mg/g}$ หลังจากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนและอุณหภูมิดังกล่าวมาเพิ่มเวลาในการก่อกัมมันต์จาก 2 ชั่วโมง เป็น 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่าได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับ $1,184.24$ และ $925.54 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ แสดงว่าระยะเวลาของการก่อกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นจาก 2 ชั่วโมงไม่มีผลทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการก่อกัมมันต์ของผงถ่านไม้ คือ อัตราส่วนโดยมวลของผงถ่านไม้:NaOH เป็น 1:3 ที่อุณหภูมิ $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และเวลา 2 ชั่วโมง

จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยมวลของผงถ่านไม้กับ NaOH พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยมวล 1:4 มีค่าต่ำกว่า 1:3 อธิบายได้ว่ามีความเป็นไปได้ว่าในกระบวนการก่อกัมมันต์โดย NaOH จะไปทำปฏิกิริยากับเถ้าที่อยู่ในผงถ่านไม้ (Liou and Wu, 2009) ซึ่งทำให้เปลืองจำนวนของ NaOH ที่ทำปฏิกิริยาความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าคือ ที่อุณหภูมิ $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อที่จะทำให้ NaOH

หลอมตัวเข้ากับสารตั้งต้นได้สมบูรณ์ (จุดหลอมเหลวของ NaOH เท่ากับ 318 °C)

2. ผลของการตรวจหากลุ่มฟังก์ชันนัลของถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาการตรวจหากลุ่มฟังก์ชันนัลของถ่านกัมมันต์ที่ก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้งที่นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ในช่วงคลื่น 4000-500 cm^{-1} พบสเปกตรัมที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 1

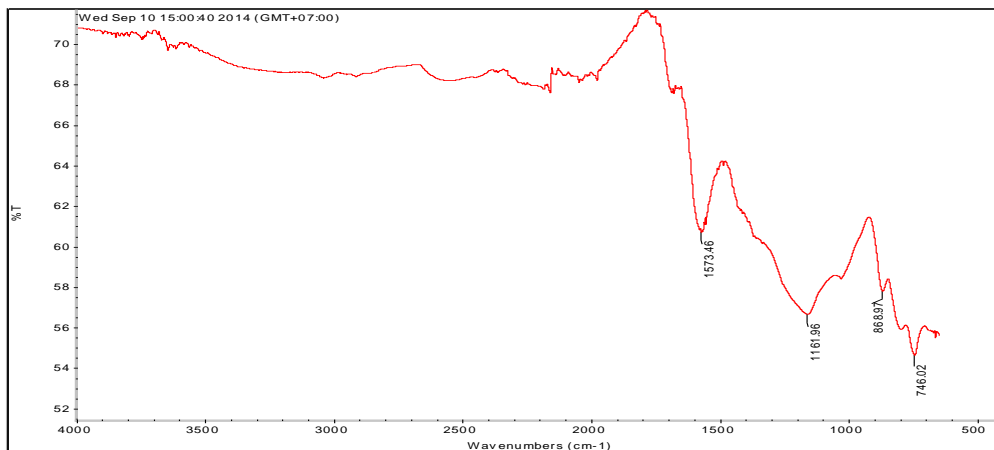
จากสเปกตรัม FT-IR ของถ่านกัมมันต์ในตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 3600-3300 cm^{-1} มีลักษณะ

กว้างและต่ำ เกิดจากพันธะ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความถี่ของการสั่นในรูปแบบการยืด (stretching vibration) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu et al. (2010) สำหรับตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1,573.45 cm^{-1} แสดงถึง C=C ของโครงสร้างโอเลฟิน (olefin structures) ที่เกิดการสั่นของโมเลกุล ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1,161.96 cm^{-1} แสดงถึง C-O ของการสั่นในกลุ่มแอลกอฮอล์ (R-OH) ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 868.97 และ 746.02 cm^{-1} แสดงถึง C-H ของการสั่นในอนุพันธ์ของเบนซีนสเปกตรัม ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ปรากฏในจะสอดคล้องกับรายงานของ Yang and Qiu (2009)

ตารางที่ 1 สมบัติบางประการของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผงถ่านไม้ที่ก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้ง

ตัวอย่างที่	เงื่อนไขการกระตุ้น			พื้นที่ผิว BET (m^2/g)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)
	ผงถ่าน:NaOH	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา(ชั่วโมง)		
AC1-600-2	1:1	600	2	421.11	534
AC1-700-2	1:1	700	2	346.23	421
AC1-800-2	1:1	800	2	254.78	298
AC2-600-2	1:2	600	2	789.84	742
AC2-700-2	1:2	700	2	563.45	456
AC2-800-2	1:2	800	2	421.85	356
AC3-600-2	1:3	600	2	1,124.52	1,247
AC3-700-2	1:3	700	2	654.54	745
AC3-800-2	1:3	800	2	421.48	456
AC4-600-2	1:4	600	2	924.58	875
AC4-700-2	1:4	700	2	584.59	642
AC4-800-2	1:4	800	2	358.47	412
AC3-600-3	1:3	600	3	1,184.24	984
AC3-600-4	1:3	600	4	925.54	874

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ของตัวอย่างที่ใช้ เช่น AC1-600-2 หมายความว่า เป็นถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนของผงถ่านต่อ NaOH เป็น 1:1 และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เป็นต้น



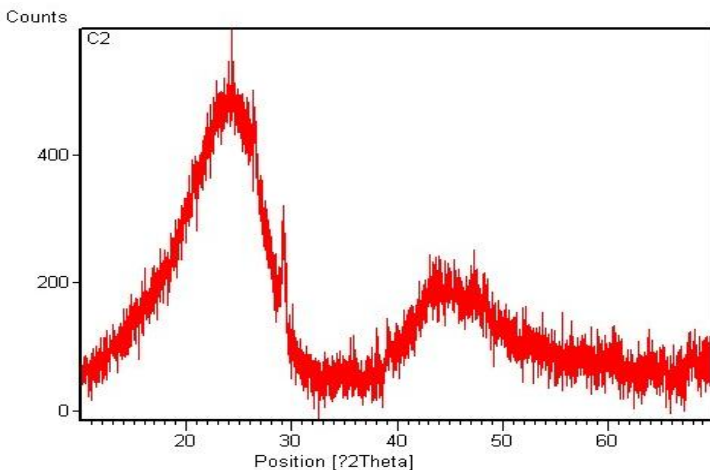
รูปที่ 1 สเปกตรัม FT-IR ของถ่านกัมมันต์ที่ก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้งในช่วงเลขคลื่น 4000-500 cm^{-1}

3. ผลการตรวจหาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

จากการตรวจหาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางเคมีแบบแห้งด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD) จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) แสดงดังรูปที่ 2

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของถ่านกัมมันต์ตำแหน่งพีคจะปรากฏที่มุมเทต้า (theta; θ) ตำแหน่งของพีคแสดงในตำแหน่งที่ 26° (ระนาบ 002) และ 43° แสดงว่าถ่านกัมมันต์มีลักษณะของโครงสร้างผลึกแกรไฟต์ (graphite) (Yongbin et al., 2007) แต่พีคในตำแหน่งดังกล่าวจะต่ำและกว้างอยู่ในช่วง $20-30^\circ$

และ $40-50^\circ$ แสดงว่ายังมีลักษณะโครงสร้างเป็นคาร์บอนอสัณฐานปนอยู่ สามารถอธิบายได้ว่าระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเกิดการจัดเรียงตัวของคาร์บอนเป็นชั้นระนาบของแกรไฟต์และในระหว่างการคาร์บอนไนซ์จะมีการกระจายตัวของโครงสร้างแกรไฟต์แบบสุ่มในถ่านกัมมันต์ ทำให้ไม่มีความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกคาร์บอน มีรายงานของ Christina et al. (2012) ว่าการให้ความร้อนที่สูงขึ้นของการคาร์บอนไนซ์และการก่อกัมมันต์จะทำให้มีผลึกขนาดเล็กของแกรไฟต์มีความสมบูรณ์ขึ้นและส่งผลกระทบต่อค่าพื้นที่พีคจำเพาะที่ดีขึ้น

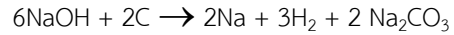


รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของของถ่านกัมมันต์ที่ก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้ง

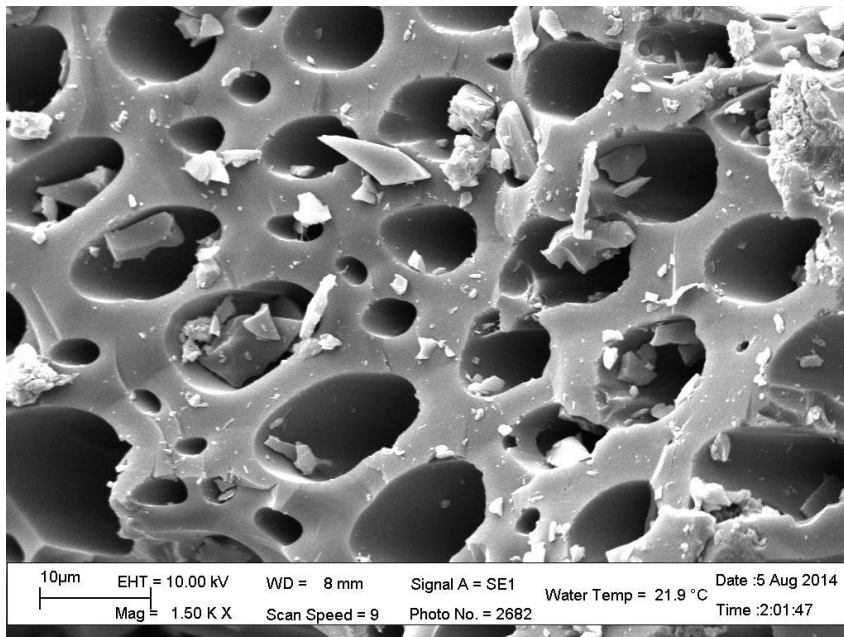
4. ผลการศึกษาโครงสร้างอสังฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างอสังฐานวิทยา (morphology) และรูปร่างลักษณะของผงถ่านไม้และถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าผงถ่านไม้มีรูพรุนจำนวนน้อยและมีขนาดเล็กใหญ่ไม่สม่ำเสมอ มีอนุภาคขนาดเล็กปนอยู่จำนวนมากทั้งบริเวณผิวและในรูพรุน ขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 0.5-10 ไมครอน ส่วนรูปที่ 4 (SEM ของถ่านกัมมันต์) ประกอบด้วยรูพรุนขนาดต่าง ๆ กระจายบนคาร์บอนโครงสร้างของรูพรุนมีลักษณะคล้ายกับคาปิลลารี (capillary like) รูพรุนเหล่านี้เป็นผลมาจากการสลายตัวของสารก่อกัมมันต์หรือเกิดปฏิกิริยาเคมี

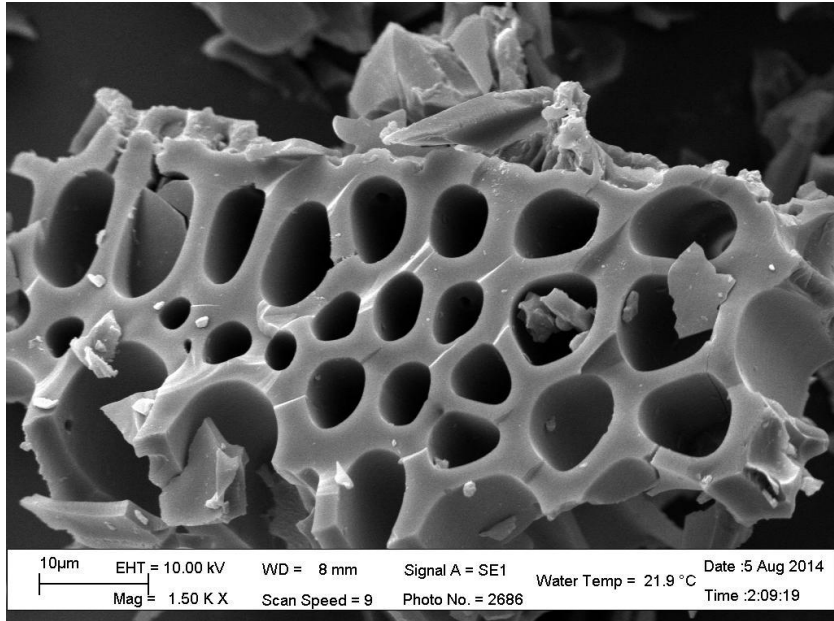
ระหว่างคาร์บอนอะตอมกับสารก่อกัมมันต์ (NaOH) ระหว่างกระบวนการก่อกัมมันต์ ดังปฏิกิริยา (Tseng, 2006)



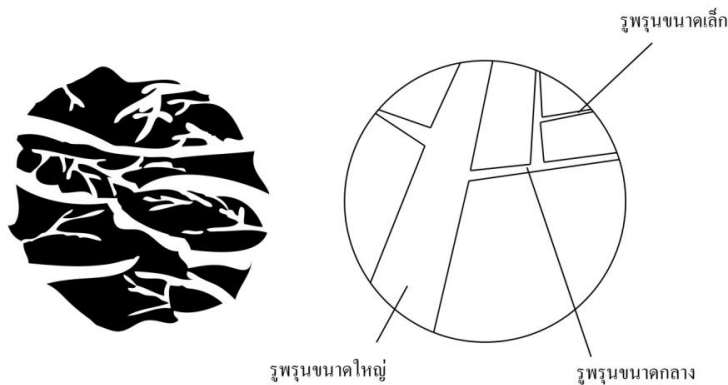
จากภาพ SEM มีลักษณะคล้ายกันคือปรากฏอนุภาคขนาดเล็กของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวภายนอกและภายในรูพรุนของผงถ่านไม้และถ่านกัมมันต์ (Sun and Webley, 2010) สำหรับถ่านกัมมันต์จะมีสิ่งปนเปื้อนน้อยกว่ามาก ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีรูพรุนอยู่ในช่วง 3-10 ไมครอน ซึ่งรูพรุนส่วนใหญ่จะเป็นรูพรุนขนาดกลาง (mesopore) และรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สามารถจำลองโครงสร้างภายใน แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 3 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงถ่านไม้



รูปที่ 4 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์

5. การประเมินค่าทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินค่าทางเศรษฐศาสตร์ (economics evaluation) เป็นการศึกษาต้นทุนการผลิตและผลผลิตอย่างมีระบบ การศึกษาต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์จากผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งทางการเกษตรที่ผ่านมามีรายงานน้อยมาก ในงานวิจัยนี้จึงเสนอการประเมินทางเศรษฐศาสตร์แบบง่ายเพื่อศึกษาต้นทุนการผลิต เช่น วัตถุดิบ (ผงถ่านไม้) สารก่อกัมมันต์ (NaOH) กรด (HCl) น้ำ และ พลังงานที่ใช้ เป็นต้น การประมาณการราคาต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการ

เปรียบเทียบกับราคาขายถ่านกัมมันต์ในประเทศและรายการราคาต้นทุนวัสดุการผลิตถ่านกัมมันต์ แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์แบบแห้งเท่ากับ 97.48 บาทต่อกิโลกรัม ขณะที่ราคาขายของท้องตลาดถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเกินกว่า 1,000 m²/g ประมาณ 210 บาทต่อกิโลกรัม ถ่านกัมมันต์ที่ก่อกัมมันต์แบบแห้งจะมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำและมีพื้นที่ผิวสูงกว่าการก่อกัมมันต์แบบดั้งเดิม (Xiaolan et al., 2012) ดังนั้นการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้งจึงเป็นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ไม่แพง

ตารางที่ 2 การประมาณการราคาต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์สำหรับ 1 กิโลกรัม

รายการ	ราคาต่อหน่วย	จำนวนที่ใช้	ราคารวม (บาท)
ผงถ่านไม้	20 บาท/kg	1.10 kg	22
NaOH (เกรดการค้า)	14 บาท/kg	3.30 kg	46.20
HCl (เกรดการค้า)	10.50 บาท/kg	0.04 kg	0.42
น้ำ	0.02 บาท/kg	42.86 kg	0.86
พลังงาน	4 บาท/kWh	7.0 kWh	28
ราคารวม			97.48
ราคาซื้อขายถ่านกัมมันต์			~210

หมายเหตุ: ราคารายการต้นทุนต่อหน่วยการผลิตเป็นการประมาณราคาตามท้องตลาด

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำผงถ่านไม้มาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงด้วยวิธีการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้ง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากผงถ่านไม้ใช้ NaOH เป็นสารกระตุ้นอัตราส่วนระหว่างปริมาณผงถ่านไม้ต่อสารกระตุ้น คือ 1:3 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น คือ 600 °C และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่สภาวะดังกล่าวได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 1,247 mg/g และพื้นที่ผิว BET เท่ากับ 1,214.52 m²/g ผงถ่านไม้มีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงได้ เนื่องจากมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงกว่า 600 mg/g ตามมาตรฐาน มอก. 900-2547 จากการหากลุ่มฟังก์ชันนัลของถ่านกัมมันต์พบว่ามีสารประกอบอินทรีย์ โดยที่องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนอสัณฐานปนกับผลึกแกรไฟต์ซึ่งสอดคล้องกับผลของสเปกตรัม XRD ส่วนลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากภาพ SEM พบรูพรุนขนาดต่าง ๆ กระจายตัวบนถ่านกัมมันต์และมีสิ่งปนเปื้อนน้อยกว่าผงถ่านไม้ และจากการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้งจะมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำคือ เท่ากับ 97.48 บาทต่อกิโลกรัม ขณะที่ราคาขาย

ของท้องตลาดถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่า 1,000 m²/g ราคาประมาณ 210 บาทต่อกิโลกรัม ทำให้มีกำไรจากค่าการตลาดถึง 53.58 % ดังนั้นผงถ่านไม้จึงเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง

เอกสารอ้างอิง

- ธราพงษ์ วิทิตสานต์. (2554). ถ่านกัมมันต์การผลิตและการนำไปใช้. พิมพ์ครั้งที่ 2. ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา. หน้า 129-130.
- ภควดี สุขอนันต์. (2551). การศึกษาพื้นที่ผิวของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ 7(2): 30-36.
- Achaw, O. W. and Afrane, G. (2008). The evaluation of the pore structure of coconut shells during the preparation of coconut shell coconut-based activated carbons. *Microporous Mesoporous Mat.* 112: 284-291.
- Ahmedna, M., Marshall, W.E. and Rao, R.M. (2000). Production of granular activated carbon from select agricultural by product and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. *Bio resour Technol.* 71: 113-123.
- ASTM Committee on Standards. (1998a). Standard Test Method for Determination of Iodine

- number of Activated carbons. In annual Book of ASTM Standards. pp. 112-125. Philadelphia, PA: ASTM Committee on Standards.
- Avelar, F.F., Bianchi, M.L., Goncalves, M., da Mota, E.G. (2010). The use of piassava fibers (*Attalea funifera*) in the preparation of activated carbon. *Bioresour Technol.* 101: 4639-4645.
- Aworn, A., Thiravetyan, P. and Nakbanpote, W. (2009). Preparation of CO₂ activated carbon from corncob for monoethylene glycol adsorption. *Colloid Surf A: Physicochem Eng Aspect.* 333: 19–25.
- Chattopadhyaya, G., Macdonald, D. G., Bakhshi, N.N., Soltan, J. S. and Dalai, A. K. (2006). Preparation and characterization chars and activated carbon from Saskatchewan lignite. *Fuel Process Technol.* 87: 997-1006.
- Christina, C.S, Zaher, H. and Ania, C.U. (2012). Preparation and characterization of activated carbon from oil sands coke. *Fuel* 92: 69-76.
- Gratiso, M.K.B, Panyathanmaporn, T., Chumnanklang, R.A., Sirinuntawittaya, N. and Dutta, A. (2008). Production of activated carbon from coconut shell: optimization using response surface methodology. *Bioresour Tech.* 99: 487-489.
- Hayashi, J., Kazehaya, A., Muroyama, K. and Watkinson, A. P. (2000). Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation. *Carbon* 38: 1873-1878.
- Hayashi, J., Yamamoto, N. and Horikawa, T.(2005). Preparation and characterization of high specific surface-area activated carbon from K₂CO₃-treated waste polyurethane. *J of Colloid Interface Sci.* 281(2): 437-443.
- Jibril, B.Y., Al-Maamari, R.S., Hegde, G., Al Mandhary, N. and Houache, O. (2007). Effects of feedstock pre-drying on carbonization of KOH-mixed bituminous coal in preparation of activated carbon. *J Anal Appl Pyrolysis.* 80: 277-286.
- Kantarli, I.C. and Yanik, J. (2010). Activated carbon from leather shaving wastes and its application in removal of toxic materials. *J Hazard Mater.* 179: 348–356.
- Li ,W., Zhang, L.B., Peng, J.H., Li, N. and Zhu, X.Y. (2007). Preparation of high surface area activated carbon s from tobacco stems with K₂CO₃ activation using microwave radiation. *Ind Crop Prod.* 27: 341-347.
- Lillo-Rodenas, M.A., Fletcher, A.J., Thomas, K.M., Cazorla-Amoros, D. and linares-Solano, A. (2006). Competitive adsorption of a benzene-toluene mixture on activated carbons at low concentration. *Carbon* 44: 1455-1463.
- Liou, T.H. and Wu, S.J. (2009). Characteristics of microporous/mesoporous carbons prepared from rice husk under base-and acid-treated conditions. *J Hazard Matter.* 172: 693-698.
- Liu, Q.S., Zheng, T., Wang, P. and Guo, l. (2010). Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation. *Industrial Crops and Products* 31: 233-238.
- Mohan, D. and Pittman Jr, C.U. (2006). Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. *J Hazard Mater.* 137: 762-811.
- Nabais, J.V., Carrot, R.M.M., Luz, V. and Ortiz, A.L. (2008). Influence of preparation conditions in the textural and chemical properties of activated carbons from a novel biomass precursor: the coffee endocarp. *Bioresour Technol.* 99: 7224-7231.

- Pietrzak, R., Wachowska, H., Nowicki, P. and Babel, K. (2007). Preparation of modified active carbon from brown coal by amoxidation. *Fuel Process Technol.* 88: 409-417.
- Prahas, D., Kartika, Y., Indraswati, N. and Ismadji, S. (2008). Activated carbon from jackfruit peel waste by H_3PO_4 chemical activation: pore structure and surface chemistry characterization. *Chem Eng J.* 140: 32-42.
- Qiao, W.M., Korai, Y., Hori, Y. and Maeda, T. (2001). Preparation of an activated carbon artifact: factors influencing strength when using a thermoplastic polymer as binder. *Carbon* 39(15): 2355-2368.
- Song, X.L., Liu, H.Y., Cheng, L. and Qu, Y.X. (2010). Surface modification of coconut-based activated carbon by liquid -phase oxidation and its effects on lead ion adsorption. *Desalination* 255: 78-84.
- Sun, Y. and Webley, P.A. (2010). Preparation of activated carbons from corncob with large specific surface area by a variety of chemical activators and their application in gas storage. *Chem Eng J.* 162: 883-892.
- Taya, T., Ucarb, S. and Karagoz, S. (2010). Preparation and Characterization of activated carbon from waste biomass. *J Hazard Mater.* 165: 481-485.
- Tong, Y.B., Liu, Q. and Chen, F. (2012). Preparation and characterization of activated carbon from waste ramulus mori. *Chem Eng J.* 203: 19-24.
- Tseng, R.L. (2006). Mesopore control of hig surface area NaOH activated carbon. *J colloid Interface Sci.* 303: 494-502.
- Xiaolan, S., Ying, Z. and Caiman, C. (2012). Novel method for Preparing activated carbons with high specific surface area from rice husk. *Ind & Eng Chem Res.* 51: 15075-15081.
- Yang, J. and Qui, K.Q. (2009). Preparation of activated carbon by chemical activation under vacuum. *Environ Sci Technol.* 43: 3385-3390.
- Yang, J. and Qiu, K.Q. (2010). Preparation of activated carbons from walnut shells via vacuum chemical activation and their application for methylene blue removal. *Chem Eng J.* 165: 209-217.
- Yen, C., Yanchao, Z., Zichen, W., Ying, L., Lili, W., Lili, D., Xiaoyan, G., Yuejia, M. and Yupeng, G. (2011). Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process. *a Review* 163: 39-52.
- Yongbin, J., Tiehu, L., Li, Z., Xiaoxian, W. and Qilang, L. (2007). Preparation of activated carbons by microwave heating KOH activation. *Applied Surface Sci.* 254: 506-512.

